

APLICACIONES DE LÁSERES DE POTENCIA A LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES

S. Palanco y J.J. Laserna (UMA, INOX-RED)

Se describe el uso de láseres de potencia para la soldadura de materiales y se discuten las variables de proceso. La presentación se ilustra con ejemplos en materiales ferríticos y austeníticos y se evalúa el rendimiento de esta tecnología para la soldadura de material plano y tubular.

The application of high-power lasers to the welding of materials is described and the main process variables are outlined. The presentation is illustrated with examples on ferritic and austenitic steels and the technology is assessed for joints in sheet-like and tube-like materials.

Introducción

El procesado láser de materiales es una tecnología creciente que ha revolucionado tanto los sistemas convencionales de producción como los diseños, abriendo posibilidades fabricación de productos antes impensables. En países de alto nivel industrial como EE.UU., Japón o Alemania, el láser se ha manifestado como una herramienta de altas capacidades de integración, velocidad de procesado y flexibilidad. No obstante, la incorporación de nuevas tecnologías a la industria es un proceso lento que requiere infraestructura técnica y conocimientos teóricos, así como una correcta transferencia de tecnología.

El láser es luz monocromática y coherente de alta intensidad que puede ser enfocada en un punto extremadamente pequeño. Ello da lugar a densidades de potencia muy superiores a las usadas en otras técnicas tradicionales de soldadura. Los beneficios inmediatos son:

- Incremento en la productividad.
- Mínima distorsión del material.
- Reducida zona afectada térmicamente.
- Escasa pérdida de propiedades.
- Ausencia de rebabas. No son necesarios trabajos posteriores.
- Posibilidad de guiado del láser con fibra óptica. Integración.
- Adaptabilidad a gran variedad de materiales.

El láser es una herramienta poderosa tanto para el corte como para la soldadura de materiales. Comparado con las tecnologías convencionales, el corte con láser es económico incluso para la producción de preseries. El haz, controlado por ordenador, puede crear cualquier contorno, por complicado que éste sea, lo cual es especialmente importante en el trabajo de chapa. El corte producido por láser es tan fino que no requiere un acabado posterior.

La soldadura láser es la técnicas de procesado láser de mayor valor añadido en la industria moderna. Por su versatilidad y grado de implantación, se constata que no es una mera alternativa, sino una técnica bien establecida que ofrece posibilidades de fabricación de otra manera inviables para el resto de técnicas. La soldadura láser es muy diferente de otras técnicas de soldadura con fusión, tanto en equipamiento, como en lo referido a los métodos empleados para abordar los distintos procesos.

Aunque se han escrito varios libros y cientos de publicaciones científicas sobre la soldadura de materiales con láser, el carácter eminentemente industrial de la técnica deja poco espacio a la publicación abierta del *know-how*, existiendo muy poca información disponible sobre las aplicaciones prácticas. La gran mayoría de usuarios se suele apoyar en los proveedores de los sistemas para obtener información sobre selección de equipos y parámetros de soldeo hasta adquirir experiencia en sus propias aplicaciones.

La intención de este capítulo es la de presentar el láser como una herramienta de soldadura, dando inicialmente una idea básica de los principios en que se basa, para posteriormente adentrarse en la parametrización y metodología de estos procesos. Finalmente, se presentan una serie de aplicaciones de soldadura láser de distintos tipos de materiales entre los que se incluyen distintas calidades de acero inoxidable, el acero al carbono, y las aleaciones de aluminio y magnesio.

Principios de la soldadura láser

Debido al crecimiento de las necesidades tecnológicas de la industria, las técnicas convencionales de soldadura se han ido quedando desfasadas, dejando nichos que son ocupados por técnicas altamente especializadas. La soldadura láser es una técnica en permanente expansión, capaz de producir cordones continuos de gran penetración, óptimas propiedades mecánicas y excelente apariencia externa. Estas características derivan del confinamiento espacial de la temperatura en la muestra que es posible mediante el enfoque preciso del haz de luz coherente. Como se muestra en la **Figura 1**, según la irradiancia depositada en el material, con una misma fuente láser se pueden alcanzar distintos tipos de procesos, siendo el de mayores requerimientos energéticos la soldadura.

Durante el proceso de soldeo un potente haz láser es enfocado sobre un punto de unas décimas de milímetro de diámetro (10^6 W cm^{-2}), provocando una rápida elevación de la temperatura del material en las cercanías de este punto e induciendo una súbita vaporización e ionización de los elementos que lo componen. Al mismo tiempo, coaxialmente al haz se forma un capilar de plasma que se extiende hacia el interior de la muestra. La energía del láser se acopla con gran eficiencia por dispersión y refracción en el interior del capilar al material fundido que lo rodea en toda su profundidad. Esta capa de material fundido no llega a colapsar al capilar en tanto que se mantenga el equilibrio de presiones entre ambos. Este régimen de soldadura es conocido universalmente como *keyhole* y, dada su naturaleza, minimiza los procesos de transferencia de energía por conducción en el material.

De esta forma, se logra el procesado a alta velocidad –varios metros por segundo– y los cordones resultantes son estrechos, profundos, con una zona afectada térmicamente (ZAT) muy reducida y con mínima distorsión de las muestras soldadas. En ocasiones, la gran capacidad de penetración de la técnica posibilita la soldadura de varias capas de material en aplicaciones de creciente interés en el sector de la automoción, como son las estructuras tipo *sandwich*. Una ventaja adicional es que la unión puede ser trazada exactamente sobre la junta existente entre los materiales a soldar. Este aspecto es de gran importancia pues, cuando el cordón penetra todo el espesor de estos, el resultado es resistente a la fatiga y a la tracción, ya que las líneas de tensión pasan a través de la junta de un material al otro.

El confinamiento del haz en el rango focal en conjunción con la ausencia de contacto entre el cabezal y la muestra a soldar ofrecen gran versatilidad de diseño de las configuraciones de unión, así como la posibilidad de alcanzar zonas estéricamente impedidas para otras técnicas de soldadura con necesidad de contacto.

Parámetros operacionales de la soldadura láser

El aspecto final de la soldadura y su calidad depende de una serie de parámetros operacionales relativos a las características del haz, a su focalización, a la dosificación de la energía irradiada al material, a la proporción de ésta que realmente se acopla en función de las propiedades superficiales y generales del propio material.

Potencia

Las fuentes láser emiten, según su naturaleza, en régimen continuo (cw), o bien en trenes de pulsos discretos de energía y frecuencia de repetición conocidas. Por lo general, el primer régimen suele venir comercialmente asociado a los láseres de CO_2 ,

mientras que el segundo es más habitual en los láseres de Nd:YAG. En el modo pulsado se debe distinguir entre la potencia de pico –la de un pulso individual- que puede llegar a alcanzar los 10^5 W y la potencia media –relativa a un tren de pulsos con una determinada frecuencia de repetición- normalmente inferior a $1.5 \cdot 10^3$ W.

Para una velocidad de procesamiento dada, la penetración, p , aumenta con la potencia media, P , del haz incidente en el material a partir de un valor umbral de formación del *keyhole*. En general, el comportamiento seguido es una función potencial del tipo:

$$p = k P^b \quad (1)$$

donde la constante b oscila normalmente entre 0.7 y 0.8. En régimen pulsado un parámetro adicional es la superposición de los puntos de soldadura. Normalmente, la unión está formada por una sucesión de pulsos que, con suficiente superposición ($> 80\%$) son capaces de sostener el modo *keyhole* y formar un cordón continuo.

Consideraciones ópticas

Para la misma velocidad de proceso y potencia media, el láser de Nd:YAG suele generar cordones más profundos que el de CO₂. Esto es debido a la longitud de onda más corta del primero ($1.06 \mu\text{m}$ frente a $10.6 \mu\text{m}$) lo que además de facilitar la absorción en el material, permite un mejor enfoque y, por tanto mayores irradiancias.

Sin embargo, para potencias en el orden de 10^3 W, los láseres de Nd:YAG utilizan modos electromagnéticos transversales (TEM) elevados, lo que no siempre hace cierta la anterior afirmación. A esto se le une el guiado por fibra óptica típico en estos láseres, que provoca una pérdida considerable de la calidad del haz (en términos de diámetro, D , y divergencia, θ) a la salida de esta.

Velocidad de proceso

Para una potencia dada, la penetración del cordón es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad de proceso, tal y como se muestra en la **Figura 2**.. La soldadura láser presenta, en general, velocidades de proceso muy superiores a otras técnicas, excepción hecha de los cordones obtenidos con láseres pulsados de Nd:YAG en modo *keyhole*, que no superan el metro por minuto para espesores de chapa superiores a 2 mm. En determinadas aplicaciones (espesores inferiores a 0.5 mm y modo cw), se pueden llegar a alcanzar velocidades de hasta 60 m min^{-1} limitadas únicamente por las propiedades dinámicas del propio material fundido. La elección de la velocidad apropiada de proceso viene dada a partir de un compromiso entre la productividad y las transformaciones físicas y químicas que tienen lugar durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento del material a soldar.

Gas de protección

La protección del metal fundido de la oxidación durante la soldadura es un factor determinante para obtener una soldadura de calidad. Como en otros métodos convencionales, esto se lleva a cabo mediante el aporte de argón, helio o una combinación de ambos. La **Figura 3** ilustra una sección de un cabezal de soldadura láser detallando el aporte de gas cuya elección viene normalmente determinada por dos factores: por un lado el elevado coste del helio, y por otro, la superior penetración obtenida con este gas debido a su mayor energía de ionización, tal y como se muestra en la gráfica de la **Figura 4**.

Materiales

Los láseres pueden soldar casi el mismo rango de materiales que otras técnicas de soldadura por fusión, sin embargo, las aleaciones de aluminio y las de cobre suelen presentar ciertos problemas de reflectividad a las longitudes de onda de los láseres industriales más empleados. De hecho, la alta reflectividad del cobre a 10.6 μm se aprovecha para fabricar sistemas de guiado para los láseres de CO₂. Como norma general, cuanto menor es la conductividad térmica o cuanto mayor es la resistividad eléctrica de un material, mayor es su absorptividad a la luz láser. Consecuentemente, las calidades de acero inoxidable soldables por técnicas convencionales constituyen materiales ideales para la soldadura láser. Las **Tablas I y II** muestran una guía básica de soldabilidad de distintos materiales de interés industrial.

Inconvenientes de la soldadura láser

Como otras técnicas de soldadura, el láser presenta una serie de inconvenientes que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar cualquier aplicación. Entre estos se encuentra las bajas tolerancias al posicionado del haz cuando se suelda a tope y sin hilo de aporte, lo requiere un posicionamiento preciso sobre la junta que, a su vez, no debe contener huecos producidos por cortes irregulares de las muestras a unir. Esto conlleva costes adicionales en cuanto a las fijaciones y la precisión de la maquinaria usada en la manipulación del haz, que es también necesaria para el control de la focalización sobre el material en caso de cordones largos sobre chapa. En otros casos como la soldadura de anillos, tubos o engranajes, un simple plato de torno puede ser suficiente.

Por otro lado, debido a las altas densidades de energía depositadas, pueden ocurrir dos procesos secundarios no deseados, como son la pérdida de material fundido por súbitas elevaciones de la temperatura en el *keyhole*, y el desenfoque del haz láser en su interacción con el plasma generado durante la soldadura. Bajo determinadas circunstancias como es el caso de la soldadura con láseres de CO₂, el plasma formado es ópticamente denso y da lugar a pérdidas por absorción y refracción de la energía láser acoplada al material. Por este motivo se hace necesaria la utilización de gases de asistencia al procesado que, proyectados a alta velocidad sobre el plasma, lo enfrían, estabilizan y deflecan, mejorando el acoplamiento láser-materia, tal y como se ilustra en la **Figura 3**.

Monitorización de procesos de soldadura láser en tiempo real

Debido al elevado número de parámetros necesarios para definir cada aplicación, la soldadura láser es una tecnología cuyos aspectos fundamentales no están totalmente estudiados. A causa de la dificultad para la monitorización en tiempo real del proceso, los estudios se han basado en gran medida en diagnósticos *post-mortem* para inferir detalles del proceso global. La información extraída de esta aproximación ha guiado la mayoría de las aplicaciones de soldeo láser. Sin embargo, la frecuencia con la que los fallos ocurren en la soldadura sugiere que un número importante de parámetros queda fuera de control. La monitorización en línea del proceso es, por tanto, necesaria para producir a alta velocidad soldaduras de gran calidad y penetración.

Dado que las elevadas temperaturas y el ambiente hostil asociados a las técnicas de soldadura pueden suponer un riesgo para las personas y los equipos propios de un laboratorio, los esfuerzos para monitorizar estos procesos se han encaminado tradicionalmente hacia una inspección remota y no invasiva. En este sentido, se han llevado a cabo varias aproximaciones a la monitorización de los procesos de corte con

láser, pero son insuficientes cuando se intentan adaptar a la soldadura. Los sensores capacitivos, ampliamente usados en el corte de chapa, se ven seriamente afectados por el plasma de soldadura, que distorsiona la respuesta del sensor.

Monitorización de procesos de soldadura láser pulsada

Como se ha descrito con anterioridad, una aplicación habitual de la soldadura láser es la unión de dos piezas a tope. Debido al reducido diámetro del haz enfocado, se requiere un posicionado muy preciso sobre la junta que queda entre las piezas con el fin de obtener una soldadura de calidad, haciéndose imprescindible el seguimiento en tiempo real de la distancia del haz a dicha junta. A continuación se presenta la monitorización en tiempo real con métodos espectroscópicos de una soldadura láser entre una muestra de acero al carbono y otra de acero inoxidable. Como se muestra en la **Figura 5**, la luz emitida por el plasma se inspecciona por medio de una fibra óptica adaptada al cabezal de soldadura. De esta forma es posible guiar la luz colectada a un laboratorio de control que ofrece el nivel de limpieza adecuado a la instrumentación de medida. La luz emergente de la fibra óptica se enfoca sobre la rendija de entrada de un espectrógrafo acoplado a una cámara CCD que registra los espectros de emisión y los transfiere a un PC.

Para esta aplicación, junto a la emisión de hierro, elemento común a ambas muestras, se monitorizó la emisión de cromo, presente únicamente en el acero inoxidable. Con el fin de ilustrar las posibilidades de la técnica, se programó el robot para que siguiese una trayectoria recta que cruzase desde la muestra de acero al carbono, atravesando la junta entre ambas y terminase sobre la muestra de acero inoxidable. La soldadura estaba compuesta por trece puntos de 1 mm de diámetro correspondientes a otros tantos pulsos del láser. Para cada pulso, se registró el espectro de emisión y la distancia a la junta de soldadura tal y como se representa en el diagrama esquemático de la **Figura 6**. En la figura se pueden observar los espectros característicos de cada zona de la soldadura. La menor intensidad del espectro del centro de la gráfica, representativo de aquellos pulsos que solapan parcialmente el hueco entre ambas muestras, tiene una doble justificación en la ausencia de material en la junta y en el cambio de condiciones focales. Con el fin de minimizar este efecto y la pérdida de precisión en la medida derivada de las fluctuaciones pulso a pulso del láser, se usó la señal de hierro como patrón interno. Se normalizaron las intensidades netas de emisión de las líneas de Cr(I) a 433.94 nm, 434.45 nm y 435.96 nm frente a la intensidad neta de emisión de la línea de Fe(I) a 432.57 nm según la siguiente función de normalización, I_n :

$$I_n = I_{Cr} / I_{Fe} \quad (2)$$

La gráfica a la derecha de la **Figura 6** muestra los resultados obtenidos. Cada punto representa el valor de I_n frente a la distancia a la junta del punto de soldadura correspondiente. Los valores de distancias negativas señalan los espectros registrados sobre la muestra de acero al carbono. En esta zona los valores de I_n tienden a cero para las tres líneas de cromo, indicando la ausencia de este elemento. Por otro lado, las tres curvas alcanzan valores constantes mayores que cero, a medida que el haz láser se adentra en la muestra de acero inoxidable. En los casos en los que el pulso láser ha incidido sobre ambas muestras se obtiene un valor predecible en función de la distancia.

Monitorización de procesos de soldadura láser en régimen continuo

La soldadura láser de aleaciones de aluminio es un proceso desafiante para la industrias de la automoción y aerospacial. Las estructuras de aluminio obtenidas con esta técnica

son más ligeras que sus equivalentes fabricadas con materiales basados en hierro y, a la vez, presentan excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, la complejidad del proceso de soldadura láser de aluminio no ha permitido una implantación a gran escala de la tecnología.

La inestabilidad asociada a este tipo de procesos se acentúa a medida que aumentan la velocidad de procesamiento y las fluctuaciones de la fuente láser que sustenta el plasma. Este tipo de soldadura se lleva a cabo con láseres de CO₂ en modo continuo de potencias superiores a 5000 W. Sin embargo, aunque la aparición de inestabilidades es continua, este hecho no implica necesariamente la formación de defectos de soldadura. Se ha encontrado que los bajos puntos de ebullición de los componentes de las aleaciones de aluminio, en conjunción con la baja viscosidad de sus fases líquidas, provocan intensas fluctuaciones de la región del plasma que sobresale del *keyhole*. Este hecho puede causar imperfecciones en el cordón de soldadura tales como muescas (*notch*) y agujeros (*blowhole*), que representan los defectos más severos y comunes.

Consecuentemente, la monitorización en tiempo real del plasma se hace imprescindible. A continuación se detallan los aspectos más relevantes de un estudio de la emisión del plasma de soldadura con láser de aluminio. Con el fin de reproducir los defectos de la soldadura de forma sistemática y predecible se han inducido fluctuaciones artificiales sobre la potencia de salida del láser. El diagnóstico espectrométrico a alta velocidad de adquisición (10⁴ espectros por segundo) ha permitido correlacionar ciertas características espectrales con la aparición de los defectos en la soldadura. La **Figura 7** muestra un esquema del experimental empleado. De acuerdo con las medidas espectrométricas y con las secuencias de imágenes de alta velocidad, en los plasmas sustentados con láseres en modo continuo se inducen ondas de detonación similares a las generadas en experimentos con láseres pulsados. En el caso de la soldadura, la expansión del plasma se absorbe parcialmente en el metal fundido, provocando oscilaciones en éste que, en el caso de las aleaciones de aluminio, se ven favorecidas por su baja viscosidad.

La **Figura 8** muestra un perfil temporal de emisión representativo de los eventos que tienen lugar durante la aparición de un defecto de soldadura, representándose la evolución temporal de la intensidad de varias líneas de aluminio y magnesio en una serie de espectros que abarcan quince ventanas temporales consecutivas de 256 ms cada una. Como se ilustra, entre los espectros #9 y #12 ocurren bruscas alteraciones de las características espectrales. Estas alteraciones comprenden el desarrollo de líneas iónicas de aluminio a 559.32 nm, 569.66 nm y 572.27 nm, y el ensanchamiento de las líneas atómicas de magnesio a 552.84 nm. El mencionado comportamiento está asociado a los defectos de soldadura y sugiere un aumento significativo en la temperatura y densidad electrónica del plasma justo antes de que ocurra la onda de detonación.

Tras ésta, el espectro puede mostrar alternativamente dos aspectos bien característicos dependiendo del tipo de defecto ocurrido: (i) en el caso del *blowhole* se observa una completa ausencia de señal, tal y como muestra el espectro de la derecha de la **Figura 8**. Este efecto se atribuyó a la falta de material en el camino óptico del láser después de la detonación. Esta hipótesis concuerda con las secuencias de imágenes de alta velocidad registradas durante el experimento, en las que se puede observar cómo el plasma emerge paulatinamente conforme el borde del *blowhole* reentra en el camino del láser. (ii) Otro caso posible es la recuperación del nivel original de la señal de forma inmediata a la detonación, hecho que coincide con la aparición de los *notches*, muescas irregulares, sin orificio, en el cordón de soldadura.

Aplicaciones de la soldadura láser

Soldadura de acero inoxidable austenítico

Durante los procesos de soldeo de los aceros austeníticos tradicionales, se produce la sensibilización a la corrosión intergranular en la ZAT, debido a precipitación de carburos de cromo en las juntas cristalinas y, consecuentemente, la descromatización en las zonas adyacentes. Los agresivos químicos atacan las zonas pobres en cromo, destruyéndose rápidamente los materiales por corrosión intergranular.

Históricamente se han desarrollado soluciones tecnológicas a este problema, que pasan por la disminución del carbono por debajo de su límite de solubilidad en la austenita a cualquier temperatura de empleo, creándose los llamados tipos L, del inglés “low carbon”. También se ha usado la aleación con titanio o niobio, elementos que se combinan preferentemente con el carbono, evitando los carburos de cromo. Estas soluciones, adoptadas como necesarias, implican incrementos del coste.

Los fenómenos de precipitación de carburos de cromo implican un mecanismo de difusión, en equilibrio con las diferentes velocidades de difusión del carbono y del cromo a las diferentes temperaturas. El elevado confinamiento espacial de la energía del láser y las elevadas velocidades de procesamiento constituyen una solución válida en la soldadura, logrando unir el material a la vez que se minimiza el gradiente térmico y por tanto, el material expuesto las temperaturas entre 500°C y 900°C, propias de precipitación de carburos.

Los ensayos de tracción y doblado practicados muestran excelentes comportamientos de las probetas de austenítico soldadas con láser, incluso en los casos en los que deliberadamente se introducen mordeduras o rechupes en el cordón por desalineamiento de las chapas soldadas.

Soldadura entre materiales ferríticos y austeníticos

Uno de los inconvenientes en el procesamiento y uso de los aceros inoxidables ferríticos es su soldabilidad. Los aceros inoxidables entran en el campo gamma cuando se calientan por encima de un intervalo entre 800 °C y 1000 °C. En el proceso de soldeo, el sólido inicialmente con estructura alfa cúbica centrada en el cuerpo, llega a fundir y al solidificar lo hace con estructura gamma cúbica centrada en las caras. Durante el enfriamiento posterior se produce la transformación martensítica, precipitando agujas de gran dureza y fragilidad, estructuralmente alfa, que afectan gravemente a la ductilidad de la unión soldada y a las inmediaciones de la ZAT.

Las uniones soldadas obtenidas con una fuente de energía como el láser logran una fusión tan confinada en el espacio que el material fundido es mínimo y, mínima también la región afectada térmicamente en torno al cordón de soldadura. Aun formándose la martensita, esta queda restringida a una zona tan estrecha que, esencialmente, genera fallos de ductilidad en operaciones como el tensionado o el doblado de la unión soldada. Las uniones soldadas con láser entre inoxidables ferríticos AISI 430 y austeníticos AISI 304 presentan un buen comportamiento para espesores de hasta 5 mm con 4 mm respectivamente de estos materiales. Debido a las propiedades mecánicas del material austenítico, el uso de espesores inferiores de este con respecto al ferrítico, favorece una mejor respuesta cuando la unión se ve solicitada.

Soldadura de estructuras de acero al carbono

Los estudios de soldabilidad con láser llevados a cabo sobre chapa de acero al carbono revelan buena soldabilidad del material en el espesor trabajado (doble chapa de 1.2 mm), para un rango de velocidades de procesamiento comprendidas entre 1.5 y 2.7 m min⁻¹.

Asimismo, se detecta dependencia de la calidad final de la soldadura con el preformado del material. Conforme las dimensiones del preformado varían en mayor medida, se requiere un mayor número de operaciones de fijación. Los parámetros individuales de proceso se ven condicionados por el preformado.

Bibliografía

1. G. Neye y P. Heider. *Proc. Conf. ECLAT'94*, (1994) 108.
2. E. Schubert, C.R. Radscheit, F. Steimmel y G. Sepold. *Proc. Conf. IBEC'96*, (1996) 50.
3. C. Weissman y W.H. Kearns (Eds.), *Welding Handbook*. American Welding Institute, Miami (1976).
4. D. Belforte y M. Levitt (Eds.), *The Industrial Laser Handbook*, Springer-Verlag, New York-Berlin-Heidelberg, (1992).
5. C. Daves. *Laser Welding, a Practical Guide*. Abington Publishing, Cambridge, (1992).
6. N. Potacioglu, P. Kapadia y J. Dowden. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 24 (1991) 15.
7. J. Dowden, W.S. Chang, P. Kapadia y C. Strange. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 24 (1991) 519.
8. M. Klassen, J. Skupin y G. Sepold. *Proc. Conf. LASER'97*, (1997) 16.
9. W. Sokolowski, G. Herziger y E. Beyer. *High Power Laser Systems and Applications*, SPIE, 1020 (1988) 96.
10. M.M. Collur y T. Debroy. *Metall. Trans. B.*, 20 (1989) 277.
11. D. Bermejo, L. Sabatier, L. Leprince y J.M. Orza, *High Power Laser Systems and Applications*, SPIE, 1279 (1990) 118.
12. A. Poueyo, L. Sabatier, G. Deshors, R. Fabbro, A.M. de Frutos, D. Bermejo y J.M. Orza. *Journal de Physique IV*, 1 (1991) 183.
13. Miyamoto y H. Mauro. *Proc. Intl. Conf. of Laser Advanced Materials Processing, LAMP'92*, (1992) 311.
14. A. Poueyo, G. Deshors, R. Fabbro, A.M. de Frutos y J.M. Orza. *Proc. Intl. Conf. of Laser Advanced Materials Processing, LAMP'92*, (1992) 323.
15. Z. Szymanski, J. Kurzyna y W. Kalita. *J. Phys. B*, 30 (1997) 3153.
16. M. Autric, P. Vigliano, D. Astic, P. Bournot y D. Dufresne. *High Power Laser Systems and Applications*, SPIE, 1020 (1988) 103.
17. M. Schellhorn y A. Eichhorn. *Optics & Laser Technol.*, 28 (1996) 405.
18. M. Schellhorn y A. Eichhorn. *Proc. XI Symposium on Gas Flow & Chemical Lasers and High Power Laser Conference, GCL/HPL'96*, (1996) 245.
19. J.D. Kim y A. Matsunawa. *International Institute of Welding* (1996) Doc. 212/893.

20. E.A. Metzbower. *Res. Suppl.*, 72 (1993) 403.
21. H. Zhang, J.P. Singh, F.Y. Yueh y R.L. Cook. *Appl. Spectrosc.*, 49 (1995) 1617.
22. T. Zacharia, S.A. David, J.M. Vitek y T. Debroy. *Metall. Trans. A, Phys. Metall. Mater. Sci.*, 20 (1989) 957.
23. H.B. Chen, L. Li, D.J. Brookfield y W.M. Steen. *NDT&E Int.*, 26 (1993) 67.
24. C.J. Lorenzen, C. Carlhoff, U. Hann y M. Jogwich. *J. Anal. Atom. Spectrom.*, 7 (1992) 1029.
25. D.P. Hand, C. Peters y J.D.C. Jones. *Meas. Sci. Technol.*, 6 (1995) 1389.
26. L.J. Radziemski y D.A. Cremers. "Spectrochemical Analysis Using Laser Plasma Excitation", en *Laser-induced Plasmas and Applications*, L.J. Radziemski y D.A. Cremers (Eds.), Marcel Dekker, New York, (1989).
27. J.A. Aguilera, C. Aragón y J. Campos. *Appl. Spectrosc.*, 46 (1992) 1382.
28. M. Sabsabi y P. Cielo. *Appl. Spectrosc.*, 49 (1995) 499.
29. Z.W. Hwang, Y.Y. Teng, K.P. Li y J. Sneddon. *Appl. Spectrosc.*, 45 (1991) 435.
30. Y.I. Lee, S.P. Sawan, T.L. Thiem, Y.Y. Teng y J. Sneddon. *Appl. Spectrosc.*, 46 (1992) 436.
31. S. Amorusso, R. Bruzzese, N. Spinelli y R. Velota. *J. Phys. B*, 32 (1999) 131.
32. S. Palanco, L.M. Cabalín, D. Romero y J.J. Laserna. *J. Anal. At. Spectrom.*, 14 (1999) 1883.
33. W. Sokolowski, G. Herziger y E. Beyer. *High Power Laser Systems and Applications*, SPIE, 1020 (1988) 96.
34. D. Bermejo, L. Sabatier, L. Leprince y J.M. Orza. *High Power Laser Systems and Applications*, SPIE, 1279 (1990) 118.
35. I. Miyamoto, K. Kamimuki y H. Mauro. *Proc. International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO'93*, (1993) 414.
36. D. Lacroix y G. Jeandel. *J. Appl. Phys.*, 81 (1997) 6599.
37. H.R. Griem, *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill, New York, (1964).
38. S. Palanco y J.J. Laserna. *Sensor para la protección de guías ópticas contra roturas por flexión*. Patente de invención número ES2119679.
39. S. Palanco y J.J. Laserna. *Sensor para la protección de guías ópticas contra roturas por torsión*. Patente de invención número ES2119678.
40. S. Palanco y J.J. Laserna. *Sensor para monitorización on-line y remota de procesos automatizados de soldadura con láser*. Patente de invención número ES2121702.

41. S. Palanco, M. Klassen , J. Skupin , K. Hansen , E. Schubert , G. Sepold y J.J. Laserna. *Spectrochim. Acta B*, 56 (2001) 561.
42. S. Palanco y J.J. Laserna. *Appl. Spectrosc.*, en prensa.

Tabla I. Soldabilidad de distintos materiales mediante láser de CO₂.

| Material | Resultado* | Comentario |
|-------------------|-------------------|--|
| Aluminio | A-B | La reflectividad de los óxidos y la conductividad térmica tienden a inhibir el proceso. |
| Serie 1000 | A-B | |
| Serie 2000 | M-B | El 2219 no se agrieta. El 2024 necesita ser rellenado con 4047 para evitar fracturas. |
| Serie 3000 | A | |
| Serie 4000 | B | 5456 y 5086 tienen buena capacidad para la soldadura. |
| Serie 5000 | A-B | |
| Serie 6000 | M-A | 6061 requiere relleno metálico, algún fundido de magnesio. |
| Latón | M | |
| Acero al Carbono | E | El latón de Cu y Zn se desgasifica para obtener buena soldadura. |
| Bajo | E | |
| Medio | B-E | Soldadura frágil con alto contenido de carbono (>0.04%). |
| Alto | A | |
| Cobre | A-B | Soldadura asistida con O ₂ buena para espesores delgados (< 3mm). |
| Acero galvanizado | A-B | |
| | | La liberación de Zn durante el proceso de soldadura debe ser controlada para evitar porosidad. |
| Acero inoxidable | B-E | |
| 304 | B-E | Escoria presente después del corte, el 303 se agrieta después de la soldadura. |
| 316 | B-E | |
| 410 | B | Aleaciones con alto contenido en carbono requieren pre- y post tratamiento térmico. |
| | | |

* A: Aceptable; B: Bueno; E: Excelente; M: Malo.

Tabla II. Soldabilidad de distintos materiales mediante láser de Nd:YAG.

| Material | Resultado* | Comentario |
|------------------|-------------------|--|
| Aluminio | A-B | |
| Serie 1000 | E | Dependiendo del espesor |
| Serie 2000 | B-E | 2024 requiere relleno (4047) |
| Serie 4000 | E | Depende del espesor. La soldadura requiere relleno. |
| Serie 5000 | B-E | 5052 y 5653 requiere relleno metálico |
| Serie 6000 | B-E | 6061 requiere relleno 4047 ó 718 |
| Serie 7000 | A-B | 7075 requiere relleno 4047 |
| Latón | M-A | Liberación de Zn con agujeros de hasta 1 mm. |
| Acero al Carbono | A-B | |
| Bajo | B | |
| Medio | B | |
| Alto | M-A | Grietas pequeñas en caliente. Soldadura frágil. |
| Cobre | B | La elevada reflectividad causa irregularidades en la soldadura y agujeros de hasta 1 mm. |
| Acero | B-E | |
| 304 | B-E | Soldadura excelente hasta 25 mm con cordones dúctiles. |
| 316 | B | |
| 430 | A | Desarrolla estructuras endurecidas. |
| 440C | M | Se recomienda pre- y post- tratamiento térmico. |
| Titanio | B | |

* A: Aceptable; B: Bueno; E: Excelente; M: Malo.

Cuadro resumen de los principales parámetros que influyen en la soldadura láser.

- Tipo de laser
- Energía por pulso
- Duracion del pulso
- Forma del pulso
- Frecuencia de repetición
- Velocidad de procesado
- Gas de protección: tipo y caudal
- Orificio del cabezal de soldadura
- Distancia focal
- Angulo de ataque
- Tren óptico / fibra
- Reflectividad del material
- Precisión del robot

Cuadro resumen de las ventajas de la soldadura láser.

- Cordones estrechos.
- Mínima zona afectada térmicamente.
- Ausencia de deformación.
- Altas velocidades de soldadura.
- Soldadura de disimilares.
- Compartición del láser en varias estaciones de trabajo.
- Integración con máquinas herramienta y robots.
- Facilidad para cambios de configuración.

Cuadro resumen de los inconvenientes de la soldadura láser.

- Necesita un buen ajuste de las piezas a soldar.
- Requiere alta precisión en el alineamiento del láser con la junta.
- Precisa de control de las condiciones de enfoque del láser.
- El equipo y los costes de mantenimiento son caros.

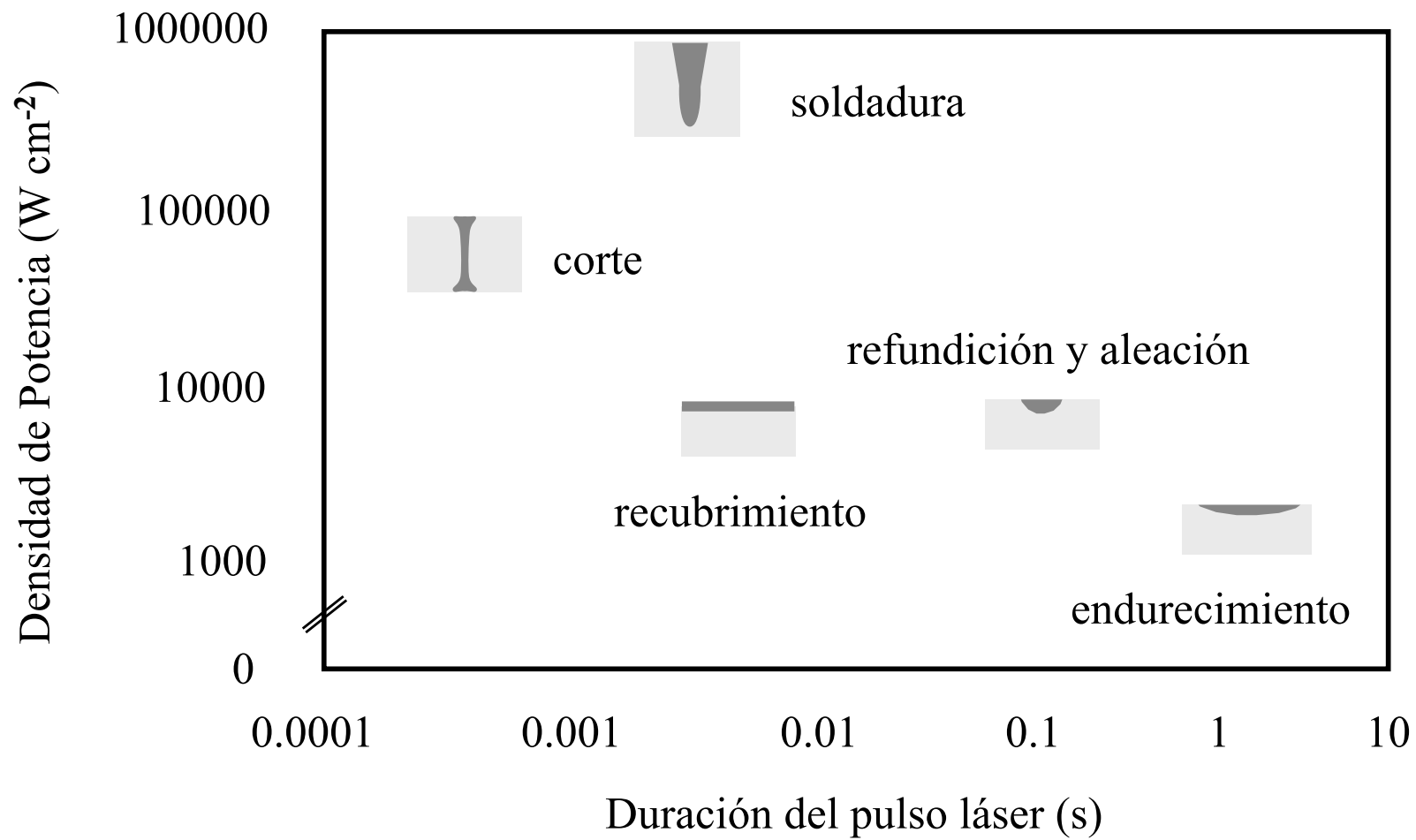


Figura 1. Dosificación de potencia según las aplicaciones

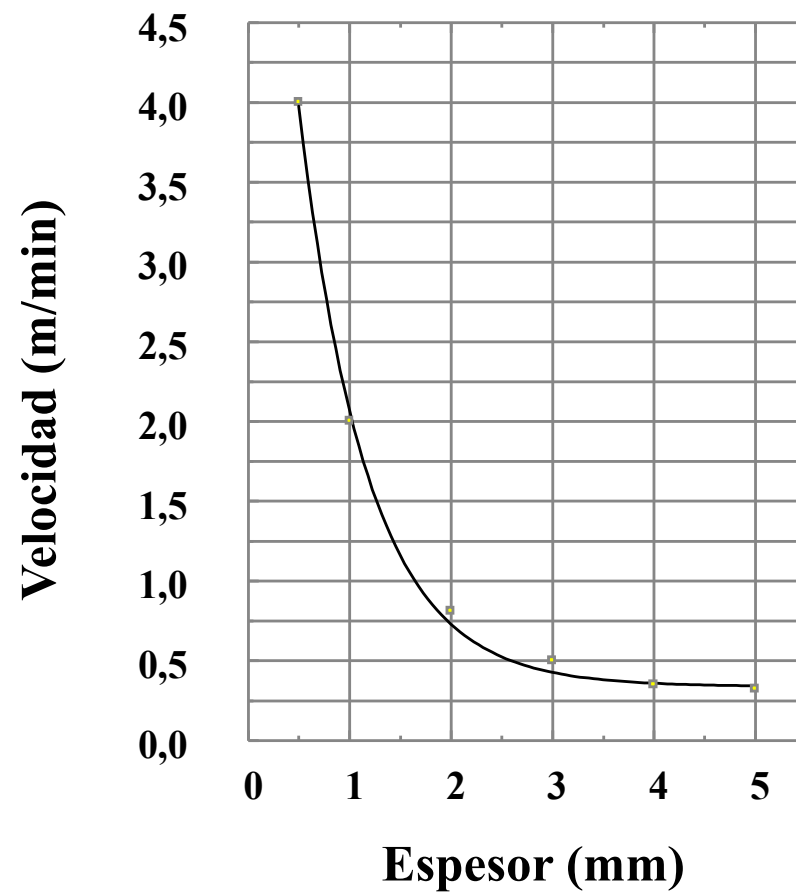


Figura 2. Ensayos de soldeo sobre AISI 304

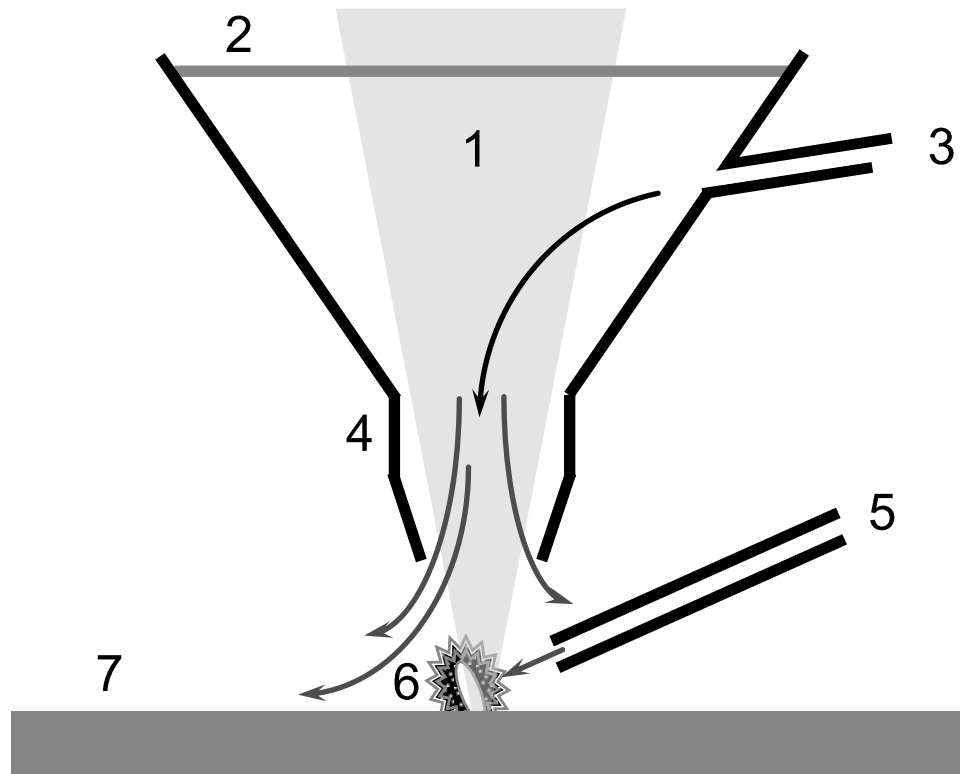


Figura 3. Diagrama esquemático de un cabezal de soldadura mostrando: (1) haz láser, (2) vidrio de protección (sólo en Nd:YAG), (3) Gas de protección frente a oxidación, (4) boquilla, (5) aporte de gas de asistencia para soplado del plasma, (6) plasma, (7) muestra.

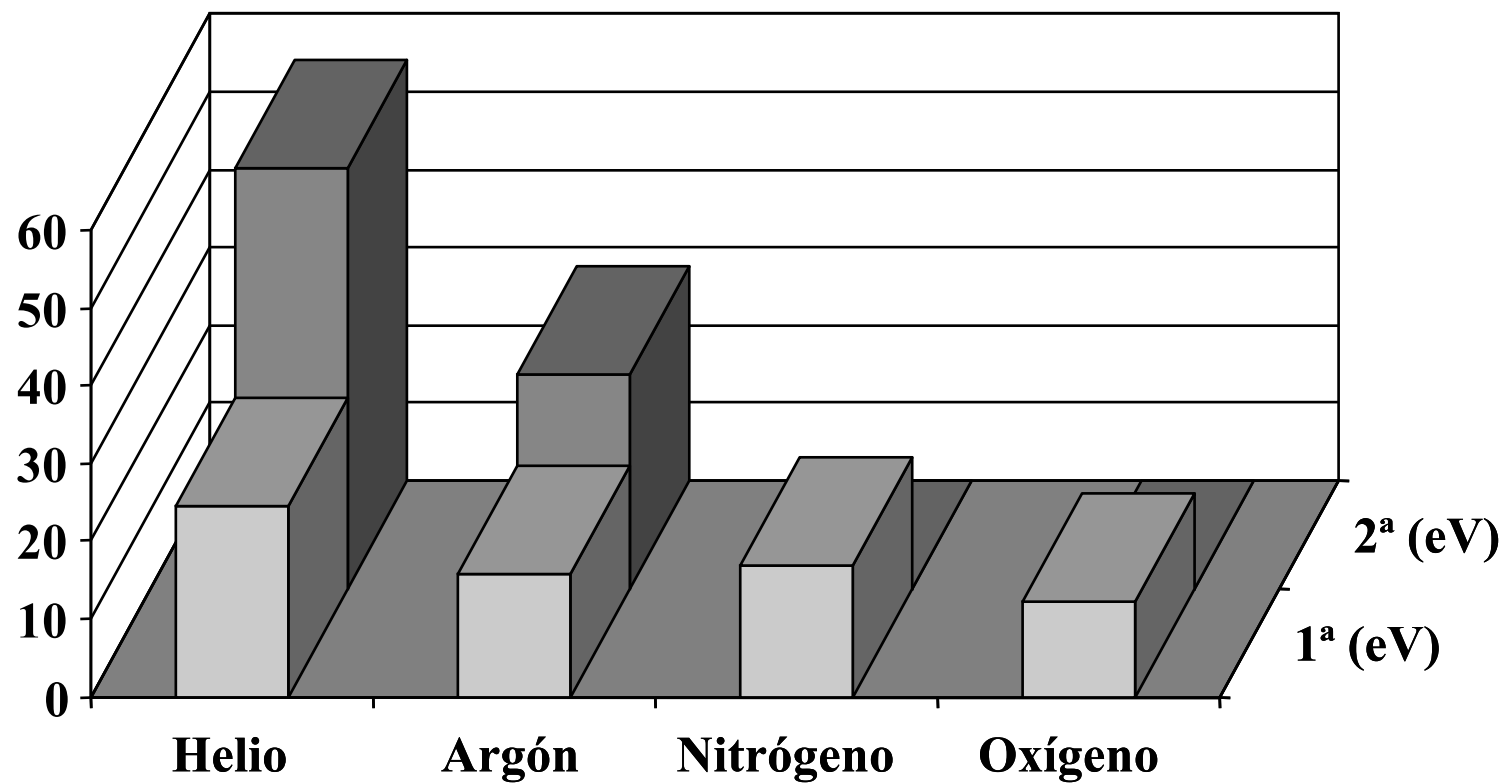


Figura 4. Primeras y segundas energías de ionización de distintos gases empleados en el procesado con láser

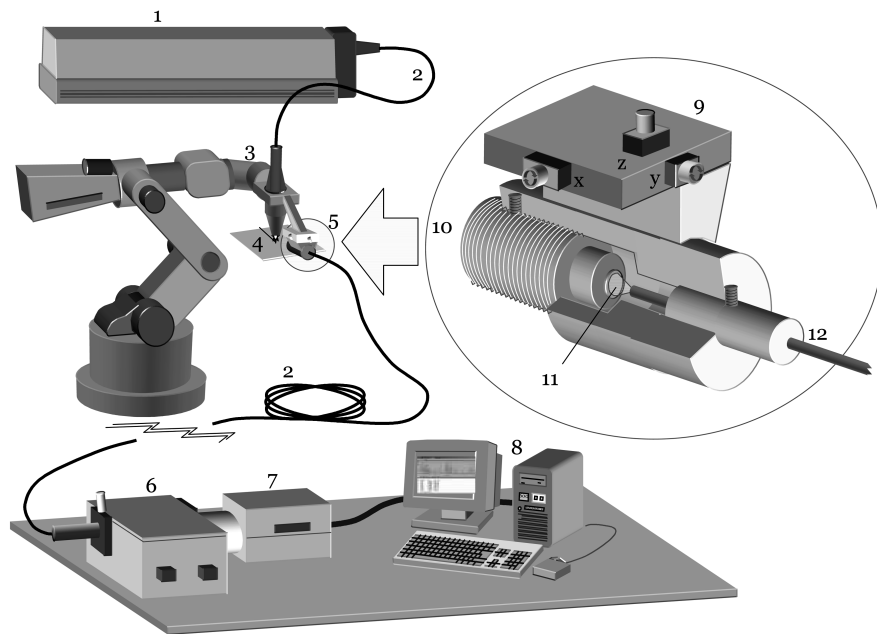


Figura 5: Esquema general. 1, Láser de Nd YAG. 2, Cables de fibra óptica. 3, Cabeza de soldadura y robot. 4, Muestra. 5, Colección de luz. 6, Espectrógrafo. 7, Detector CCD. 8, PC. Ampliación del dispositivo de colección de luz: 9, Etapas lineales x-y-z. 10, Ajuste de enfoque y objetivo de microscopio. 11, Lente de salida del objetivo. 12, Conector de la fibra óptica.

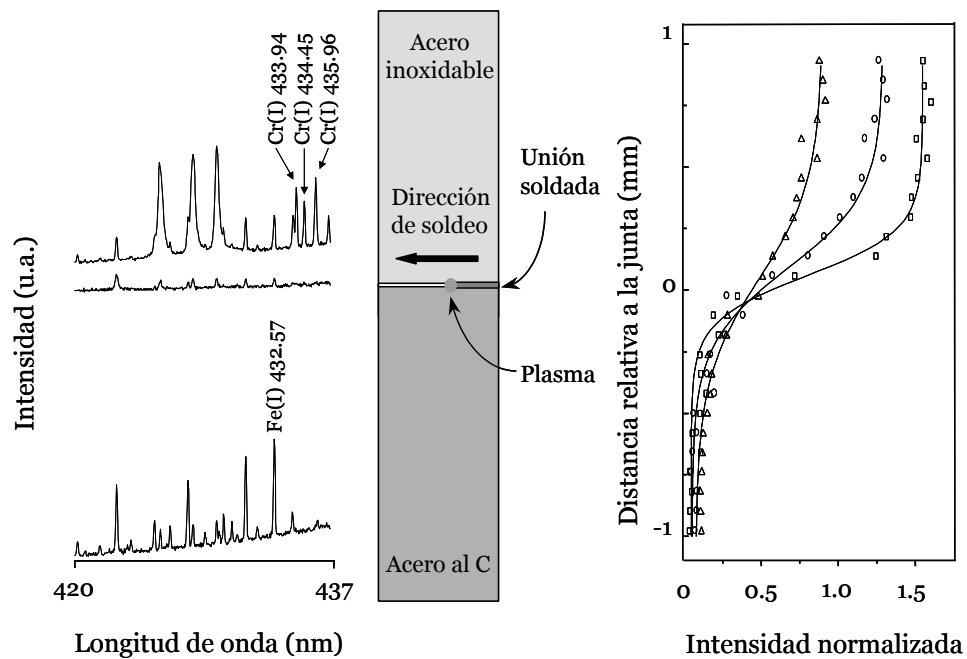


Figura 6: A la izquierda, espectros tipo adquiridos a distintas distancias del punto de soldadura a la junta existente entre las muestras. La comparación entre los espectros de acero inoxidable (arriba) y los de acero al carbono (abajo) revela la existencia de cromo únicamente en el primero. A la derecha, se muestra el comportamiento de las tres líneas de Cr(I) a 433.94 nm (○), 434.45 nm (△) y 435.96 nm (□) normalizadas, en función de la distancia del punto de soldadura a la junta.

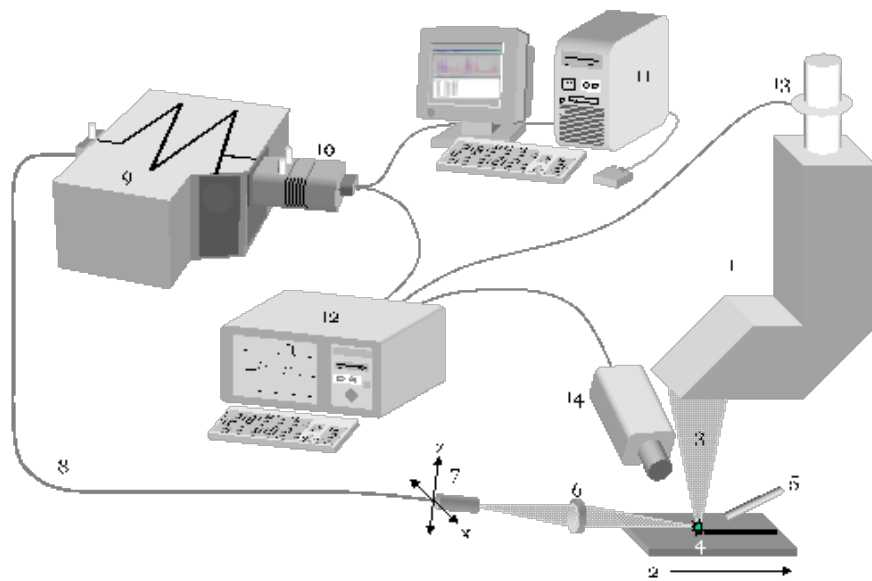


Figura 7: Dibujo esquemático del experimento mostrando los distintos componentes: 1, Cabeza de soldadura. 2, Muestra y dirección de procesado. 3, Haz láser. 4, Plasma. 5, Boquilla del gas de protección. 6, Lente de colección. 7, Posicionador XZ albergando el extremo de fibra óptica. 8, Fibra óptica. 9, Espectrógrafo. 10, CCD. 11, PC. 12, Registrador de señales transitorias. 13, Monitor de potencia de láser de respuesta rápida. 14, Cámara de alta velocidad.

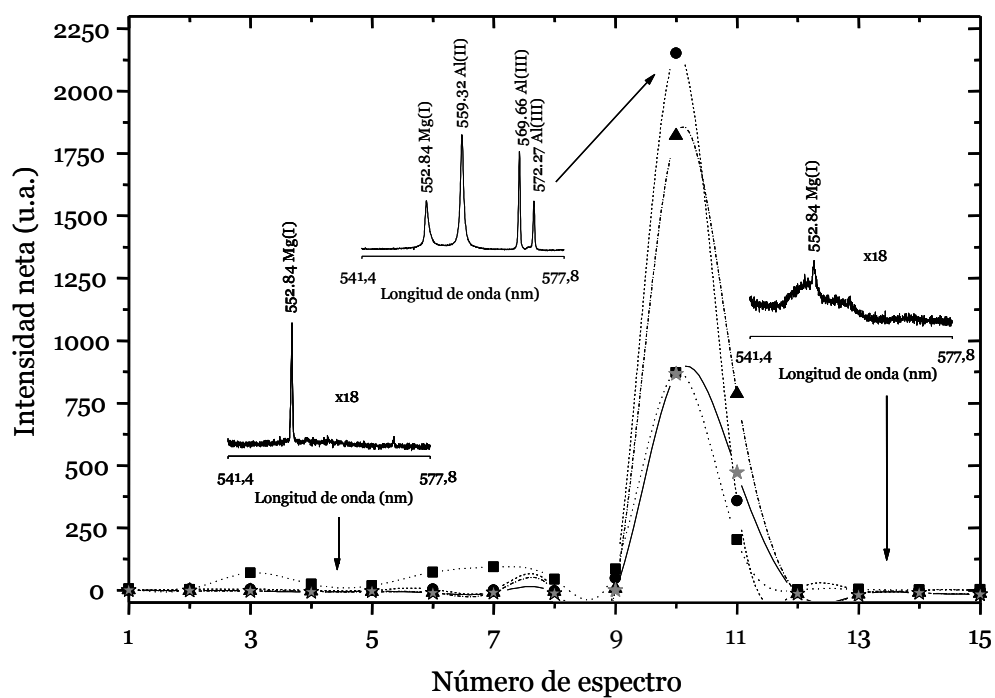


Figura 8: Intensidad neta de varias líneas de emisión de aluminio y de magnesio durante la formación de un blowhole. ■ 552.84 Mg(I), ● 559.32 Al(II), ▲ 569.66 Al(III), ★ 572.27 Al(III). Cada espectro cubre una ventana temporal de 256 μ s.